

الحساب الحراري لمحرك تحريضي ثلاثي الطور باستخدام التمثيل الحراري المكافئ

الدكتور عزت حسن *

الدكتور حبيب شيخوك **

نزار سليمان ***

(قبل للنشر في 2005/2/6)

□ الملخص □

يقدم هذا البحث شرحاً مفصلاً عن أهم الطرائق التي نستطيع بوساطتها التقليل من الضياعات الأساسية في المحركات التحريضية وتحسين أداء عملها. تمت دراسة الضياعات المختلفة في المحرك التحريضي ثلاثي الطور، وبشكل أساس المغناطيسية وكيفية التخفيف من قيمتها عن طريق التحكم بمجموعة معاملات متعلقة بنوعية المواد الفعالة المستخدمة في بناء المحرك. كذلك يتطرق البحث إلى طريقة أخرى في تحسين أداء المحرك عن طريق عملية التبادل الحراري بين أجزاء المحرك والوسط الخارجي وذلك عن طريق تمثيل هذا المحرك بدارة حرارية (مخطط حراري مكافئ) ، واعتماداً على هذا المخطط تم وضع جملة من المعادلات الجبرية الخطية تحوي على متغيرات يمكن برمجتها ، تتعلق بنوعية المواد الفعالة والعازلة المستخدمة في بناء المحرك والأبعاد التصميمية له بحيث نخفف من درجة حرارة المحرك ونحسن من مردوده .

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.
** أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.
*** طالب ماجستير - قسم هندسة الطاقة الكهربائية بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

Thermal Calculation for Three-Phase Induction Motors, Using the Thermal Equivalent Modeling

Dr. Izzat Hasan *
Dr. Habib Sheikhouk**
Nizar Suleiman***

(Accepted 6/2/2005)

□ ABSTRACT □

We prove in our recent research a clear discussion about the most important methods by which we can decrease the basic loss-in the induction motors, and improve their efficiency

Different losses were studied ,originally the basic magnetic losses, to find the optimal way of its reduction using special controlling parameters in the kind of an insulating materials used in that designed motors. Also we studied in our work the way of improving the motors efficiency by thermal exchange method between the motors part and the external medium, by modeling thermal motors with an thermal circuit. to achieve this, we used especial linear algebraic equations which contain programmable parameters. Choosing the above mentioned insulating materials and motors- parts-dimension could help us to decrease the amount of motors temperature, and increase their efficiency.

*Assist. Prof. Electric Power Eng. Dept. F.M.E.E. In Tishreen University-Lattakia-Syria

**Assist. Prof. Electric P0wer Eng. Dept. F.M.E.E. In Tishreen University-Lattakia-Syria .

*** Reearch Student For This M. Sc. Work, At The Electric Power Eng. Dept. F. M. E. E. In Tishreen University-Lattakia-Syria .

مقدمة:

يلعب تطور الطاقة الكهربائية دوراً هاماً وكبيراً في توفير وتأمين التطور العلمي والتقني السريع والمستمر، حيث تدخل هذه الطاقة في شتى المجالات الصناعية والتجارية والزراعية والنقل والسكنية وغيرها، حتى أصبح يقاس تطور أي بلد بمقدار استهلاكه للطاقة الكهربائية. تنتج الطاقة الكهربائية كلها تقريباً بواسطة الآلات الكهربائية (المولدات التوربينية في محطات التوليد الحرارية والنووية والمولدات الهيدروليكية في المحطات المائية) وتعتبر المحركات الكهربائية من أكبر مستهلكات الطاقة الكهربائية.

إن الهدف الأساس من بناء أو استخدام الآلة الكهربائية هو التحويل الكهروميكانيكي للطاقة، الذي ترافقه ضياعات في هذه الطاقة تتحول إلى حرارة بفعل جول، والتي تؤدي إلى تسخين الأقسام الفعالة والتصميمية للآلة، وبالتالي إلى الارتفاع في درجة حرارتها. يعتمد التحويل الكهروميكانيكي على جملة قوانين فيزيائية ويعتبر قانون الكهروميكانيكا والميكانيكا أساس هذه القوانين. لكن من غير الممكن إطلاقاً تصميم آلة كهربائية تعمل بشكل طبيعي من دون إجراء الحسابات الهيدروليكية والحرارية والديناميكا الهوائية، والتي تعتمد على قوانين الترموديناميكا والديناميكا الهوائية. كما أن عملية انتقال الحرارة في الآلات الكهربائية من مكان توليدها (انبعاثها) إلى الوسط الخارجي تؤدي إلى تسخين أجزاء الآلة إلى درجة فوق درجة حرارة الوسط الخارجي، أما آلية انتقالها فتتم بثلاث طرق أساسية [6, 7]:

بالناقلية الحرارية، بالحمل الحراري وبالإشعاع الحراري، والطاقة الحرارية المنقولة يمكن أن تعتبر كتدفق حراري يسري من المنطقة ذات درجة الحرارة العليا إلى المنطقة ذات درجة الحرارة الدنيا. إن هذا المفهوم يوافق المقولة الرياضية "التدفق الشعاعي". يواجه أحياناً جريان التدفقات الحرارية في الآلات الكهربائية عوائق أو مقاومات كبيرة خلال مسارها من مكان انبعاثها إلى الوسط الخارجي ويمكن أن تكون هذه العوائق أو الصادات أجسام صلبة أو سائلة أو غازية، ويمكن تمثيلها أو التعبير عنها بالمقاومة الحرارية للتدفق، وهذه المقاومة تشبه في دورها المقاومة الكهربائية لسريان التيار في الدارات الكهربائية. تعتبر الآلة الكهربائية كتلة غير متجانسة حرارياً، بمعنى آخر لا يمكن اعتبار جميع أقسام الآلة تملك نفس الفعالية في عملية انتقال الحرارة وتبديدها، لذا عند تصميم أي آلة كهربائية يجب أن يؤخذ ذلك بالحسبان، وكلما كان المصمم قادراً على تحسين عملية انتقال الحرارة من المصابيح الحرارية في الآلة الكهربائية إلى الوسط الخارجي كلما تحسنت مؤشرات الطاقة للآلة وتحسنت مواصفات عملها وزادت موثوقيتها وزمن استثمارها.

حساب الضياعات في المحرك التحريضي:

تقسم الضياعات في الآلات الكهربائية إلى نوعين [2, 4, 5]:

ضياعات أساسية وضياعات إضافية وتتكون الضياعات الأساسية من الضياع الكهربائي الحاصل في الملفات التي يسري بها التيار ومن الضياع الميكانيكي والضياع الحديدي الحاصل في الدارة المغناطيسية للآلة الكهربائية بسبب تيارات فوكو وتيارات التعويق (البطاء) المغناطيسي. أما الضياعات الإضافية فتتكون من الضياعات السطحية والترددية (النبضية) والضياعات في الملفات وفي الدارة المغناطيسية والناتجة عن الفيض المغناطيسي المتسرب وتشوه الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية عند الحمولة، وسوف ندرس أهم هذه الضياعات نظراً لأهميتها في موضوع البحث.

1- الضياعات الأساسية:**1-1- الضياعات الكهربائية (الأومية):**

تنتج هذه الضياعات عند التحميل من خلال التيار المار في ملفات الثابت والدائر للمحرك وتعتمد هذه الضياعات بشكل تقريبي على مربع تيار الحمل، وتعطى بالعلاقة التالية للثابت والدائر:

$$P_{Cu1} = m_s \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (1)$$

$$P_{Cu2} = m_r \cdot I_r^2 \cdot R_r \quad (2)$$

حيث أن:

m_r, m_s - عدد أطوار الثابت والدائر بالترتيب؛

R_r, R_s - المقاومة الأومية لكل طور من أطوار الثابت والدائر بالترتيب؛

I_r, I_s - تيار الطور لكل من الثابت والدائر بالترتيب.

تعتمد كل من مقاومة الثابت والدائر على درجة حرارة المحرك، لذا تقاس هذه المقاومة عند درجة حرارة الوسط المحيط (θ_0) ثم تحدد درجة الحرارة (θ) للمحرك عند العمل وتحدد عندئذ المقاومة الأومية الموافقة بالعلاقة التالية:

$$R_\theta = R_{20} \frac{K + \theta}{K + \theta_0} \quad (3)$$

حيث أن:

R_θ - المقاومة الأومية المقاسة عند درجة الحرارة (θ) للمحرك؛

R_{20} - المقاومة الأومية عند درجة حرارة الوسط الخارجي (θ_0)؛

K - ثابت يتعلق بنوع معدن الملفات أو النواقل وهو يساوي (245) من أجل نواقل من الألمنيوم

ويساوي (235) من أجل نواقل من النحاس.

1-2- الضياعات الحديدية:

تتكون الضياعات الحديدية في الآلة التحريضية من الضياعات الإعصارية (تيارات فوكو) ومن الضياعات الناتجة عن التعويق المغناطيسي، وتكون الضياعات الحديدية في المحرك التحريضي ثلاثي الطور ذي الدائر المقصور موزعة تقريباً بالتساوي على [2]:

- الضياعات الحديدية في قلب الثابت ($P_{Fe1,Y}$)؛

- الضياعات الحديدية في أسنان الثابت ($P_{Fe1,T}$)؛

- الضياعات الحديدية في الجزء الدائر ($P_{Fe2,R}$)

تتناسب الضياعات بفعل التعويق المغناطيسي مع التردد (f) ومع القيمة العظمى لكثافة التحريض المغناطيسي، أي مع درجة الإشباع المغناطيسي. أما الضياعات بفعل تيارات فوكو فتتناسب طرماً مع مربع التردد وأيضاً مع مربع القيمة العظمى لكثافة التدفق المغناطيسي، وتعطى العلاقات المعبرة عن ذلك بما يلي:

$$P_H = \sigma_H \cdot (f/100) \cdot B^2 \cdot m \quad (4)$$

$$P_E = \sigma_E \cdot (\Delta_{Fe} \cdot f/100 \cdot B)^2 \cdot m \quad (5)$$

$$P_{Fe} = P_H + P_E = [(\sigma_H \cdot 100/f + \sigma_E \cdot \Delta_{Fe}^2) \cdot (f/100)^2] \cdot B^2 \cdot m \quad (6)$$

حيث أن:

σ_H - معامل الضياع بفعل التعويق المغناطيسي ؛ σ_E - معامل الضياع بفعل تيارات فوكو ؛
 Δ_{Fe} - سماكة الصفائح الحديدية المستخدمة في صناعة قلوب ثابت ودائر المحرك التحريضي ؛
 m - وزن الحديد ؛ f - التردد ؛ B - القيمة العظمى لكثافة التدفق المغناطيسي بالتسلا.
 تعطى الضياعات الحديدية الكلية للمحرك التحريضي بالعلاقة:

$$P_{Fe,T} = P_{Fe1,Y} + P_{Fe1,T} + P_{Fe2,R} \quad (7)$$

$$P_{Fe,T} = P_{FeH1,Y} + P_{FeE1,Y} + P_{FeH1,T} + P_{FeE1,T} + P_{FeH2,R} + P_{FeE2,R} \quad (8)$$

حيث أن:

$$P_{Fe2,R} = P_{FeH2,R} + P_{FeE2,R} \quad ; \quad P_{Fe1,T} = P_{FeH1,T} + P_{FeE1,T} \quad ; \quad P_{Fe1,Y} = P_{FeH1,Y} + P_{FeE1,Y}$$

يعتمد المعاملان (σ_H) و (σ_E) بالإضافة إلى وزن الحديد (m) في المعادلات (4) و (5) على طبيعة المواد المكونة ويمكن وضع هذه المعادلات كعوامل تعتمد على الفيض المغناطيسي والتردد:

$$\frac{P_H}{P_{NH}} = \frac{\sigma_H \cdot f/100 \cdot B^2 \cdot m}{\sigma_H \cdot f_N/100 \cdot B_N^2 \cdot m} = \frac{f}{f_N} \left(\frac{\Psi}{\Psi_N} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{P_E}{P_{NE}} = \frac{\sigma_E [\Delta_{Fe} \cdot f/100 \cdot B]^2 \cdot m}{\sigma_E [\Delta_{Fe} \cdot f_N/100 \cdot B_N]^2 \cdot m} = \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi_N} \right)^2 \quad (10)$$

حيث أن:

$$\frac{B}{B_N} = \frac{A_{eff} \cdot \Psi}{A_{eff} \cdot \Psi_N} = \frac{\Psi}{\Psi_N} \quad (11)$$

إذ أن:

(Ψ) - الفيض المغناطيسي ؛ (Ψ_N) - الفيض المغناطيسي الاسمي ؛ (f_N) - التردد الاسمي ؛
 (A_{eff}) - المساحة الفعالة.

يمكن أن يعطى التدفق المغناطيسي في الثابت والدائر كما يلي:

$$\Psi_1 = \sqrt{\Psi_{1d}^2 + \Psi_{1q}^2} \quad (12)$$

$$\Psi_2 = \sqrt{\Psi_{2d}^2 + \Psi_{2q}^2} \quad (13)$$

يتطلب استخدام المعادلات (9) و (10) أن تكون نسبة التردد في ثابت ودائر الآلة كنسبة الضياعات في الحديد كما في المعادلة (8). إن تحديد نسبة الضياعات في الآلة يمكن أن يتم بواسطة تقسيم نسبة الضياعات الحديدية الكلية وفقاً لما يلي:

1- تتوزع الضياعات الحديدية الكلية بين الثابت والدائر باستخدام المعامل (K_S)

$$P_{Fe1} = K_S \cdot P_{Fe,T} \quad (14-a)$$

$$P_{Fe2,R} = P_{Fe2} = P_{Fe,T} (1 - K_S) \quad (14-b)$$

2- تتوزع الضياعات الحديدية في الثابت بين الأسنان والقلب باستخدام المعامل (K_T)

$$P_{Fe1,Y} = K_T \cdot P_{Fe1} \quad (15-a)$$

$$P_{Fe1,T} = P_{Fe1} (1 - K_T) \quad (15-b)$$

3- يمكن أن تقسم الضياعات المحسوبة في البند (1) و (2) بالتساوي بين الضياعات بفعل التعوييق

المغناطيسي والضياعات بفعل تيارات فوكو باستخدام المعاملات الثلاث (H_Y, H_T, H_R)، حيث أن:

$$P_{FeH1,Y} = H_Y \cdot P_{Fe1,Y} \quad (16-a)$$

$$P_{FeE1,Y} = (1 - H_Y) \cdot P_{Fe1,Y} \quad (16-b)$$

$$P_{FeH1,T} = H_T \cdot P_{Fe1,T} \quad (16-c)$$

$$P_{FeE1,T} = (1 - H_T) \cdot P_{Fe1,T} \quad (16-d)$$

$$P_{FeH2,R} = H_R \cdot P_{Fe2,R} \quad (16-e)$$

$$P_{FeE2,R} = (1 - H_R) \cdot P_{Fe2,R} \quad (16-f)$$

ويكون تردد الدائر يساوي:

$$f_2 = f_S = f_1 - f \quad (17)$$

بتبديل المعادلات السابقة (14) و (15) و (16) بالمعادلات (9) و (10) نحصل على:

$$P_{FeH1,Y} = H_Y \cdot K_T \cdot K_S \cdot P_{NFe,T} \cdot \frac{f_1}{f_{1N}} \cdot \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1N}}\right)^2 \quad (18-a)$$

$$P_{FeE1,Y} = (1 - H_Y) \cdot K_T \cdot K_S \cdot P_{NFe,T} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1N}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1N}}\right)^2 \quad (18-b)$$

$$P_{FeH1,T} = H_T (1 - H_T) K_S \cdot P_{NFe,T} \cdot \frac{f_1}{f_{1N}} \cdot \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1N}}\right)^2 \quad (18-c)$$

$$P_{FeE1,T} = (1 - H_T) \cdot (1 - K_T) K_S \cdot P_{NFe,T} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1N}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1N}}\right)^2 \quad (18-d)$$

$$P_{FeH2,R} = H_R \cdot (1 - K_S) \cdot P_{NFe,T} \cdot \frac{f_2}{f_{2N}} \cdot \left(\frac{\Psi_2}{\Psi_{2N}}\right)^2 \quad (18-e)$$

$$P_{FeE2,R} = (1 - H_R) \cdot (1 - K_S) \cdot P_{NFe,T} \cdot \left(\frac{f_2}{f_{2N}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Psi_2}{\Psi_{2N}}\right)^2 \quad (18-f)$$

إن معاملات تقرييق (توزيع) الضياع (H_Y, H_T, H_R, K_S, K_T) تختلف باختلاف الآلة الكهربائية وتعتمد

على نوعية المواد الفعالة المستخدمة في تصميم هذه الآلة وهي تقع بين (0.33) و (0.99).

3-1-الضياعات الميكانيكية:

تعود معظم الضياعات الميكانيكية غالباً إلى ضياعات الاحتكاك للأجزاء الدوارة والتي تتكون من احتكاك كراسي التحميل "الرولمانات" والمسفرات وإلى ضياعات التهوية، وكذلك الطاقة الضائعة من عملية تحريك الهواء داخل الآلة التحريضية وتختلف قيمة هذه الضياعات باختلاف درجة الحماية الميكانيكية للمحرك ونظام التهوية أيضاً. يمكن معرفة هذه الضياعات من تجربة العمل على فراغ للمحرك، وعلى كل حال فإن هذه الضياعات تؤثر بشكل واضح على سخونة المحرك وارتفاع درجة حرارته [1, 4, 5].

2- الضياعات الإضافية:

تظهر الضياعات الإضافية عند الحملية تحت تأثير الساحة المغناطيسية التسريية، وتأرجح التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية، والتوزيع المتدرج للقوة المحركة الكهربائية لمفلي الثابت والدائر، والعديد من العوامل الأخرى. تظهر في المحركات التحريضية ذات الدائر المقصور ضياعات إضافية ناتجة عن التيارات العرضية، أي التيارات المارة بين قضبان الدائر المقصور عبر صفائح الدائر. سنعتبر أن الضياعات الإضافية عند عمل المحرك في النظام الاسمي تساوي (0.5%) من الاستطاعة المستجرة من الشبكة، أي:

$$P_{dn} = 0.005P_1 = 0.005 \cdot P_2 / \eta$$

تحسب هذه الضياعات عند أي حملية مختلفة عن الحملية الاسمية بالعلاقة التالية:

$$P_d = P_{dn} (I_1 / I_{1n})^2$$

حيث (I_1) يمثل التيار الموافق للحملية على المحرك و (I_{1n}) هو التيار عند الحملية الاسمية [1, 4, 5].

طرائق انتقال الحرارة في المحرك التحريضي:

تفيدنا دراسة انتقال الحرارة في المحرك التحريضي في معرفة المنابع الأساسية للحرارة وتسهل علينا آلية دراستها عن طريق معرفة آلية انتقال هذه الحرارة في أجزاء المحرك وهي تتم بثلاث طرق: بالموصلية الحرارية، بالحمل الحراري وبالإشعاع الحراري [1, 6, 7].

1- انتقال الحرارة بالموصلية:

تعطى المعادلة التفاضلية اللازمة للموصلية الحرارية بالإشتقاق الجزئية:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{\lambda} \cdot Q \quad (19)$$

حيث أن (a) يمثل معامل الانتشار الحراري ويعطى بالعلاقة:

$$a = \lambda / (\rho \cdot C_p) \quad (20)$$

إذ أن:

C_p - السعة الحرارية النوعية للمادة وتقدر بـ ($J / (Kg \cdot C^0)$) ؛

Q - كمية الحرارة الناتجة وتقدر بـ (W / m^3) ؛

ρ - كثافة المادة وتقدر بـ (Kg / m^3) ؛

λ - معامل الموصلية الحرارية ويقدر بـ ($W / (m \cdot C^0)$) ؛

θ - درجة الحرارة وتقدر بـ C^0 .

من أجل نظام أحادي البعد يكون:

$$q = -\lambda \cdot \partial \theta / \partial x \quad (21)$$

حيث (q) - كثافة التدفق الحراري بـ (W / m^2) ؛ (x) - المسافة وتقاس بالمتر .

لذا تكون المقاومة الحرارية بين نقطتين (x_1) و (x_2) هي

$$R_{th} = \frac{x_1 - x_2}{\lambda \cdot A} \quad (22)$$

حيث (A) هي مساحة مقطع المادة وتقدر بالمتر مربع.

يبين الجدول (1) معامل الموصلية الحرارية لبعض المواد المستخدمة في تصميم الآلات الكهربائية.

2- انتقال الحرارة بالحمل:

تعطى عملية انتقال الحرارة بالحمل بالعلاقة التالية:

$$q = \alpha_c (\theta_w - \theta_f) \quad (23)$$

حيث أن: (θ_w) - درجة حرارة السطح؛ (θ_f) - درجة الحرارة في نقطة ما من السطح؛

(α_c) - معامل انتقال الحرارة ويعتمد على:

- طبيعة التدفق (صفحي أو مضطرب)؛
- الشكل الهندسي للجسم أو للسطح؛
- طبيعة نقل الحرارة (طبيعي أو قسري)؛
- متوسط الحرارة والميزات الفيزيائية للسائل.

إن هذا المعامل له علاقة بعدة أرقام ثابتة ، أي:

$$\alpha_c = f(N_a, P_r, G_r, R_e) \quad (24)$$

حيث أن (N_a) هو عدد نوسيلت (Nusselt) وتكون نسبته لمعامل انتقال الحرارة هي:

$$N_a = \alpha_c \cdot l / \lambda_f \quad (25)$$

جدول (1) -معامل الموصلية الحرارية لبعض المواد المستخدمة في تصميم الآلات الكهربائية

معامل الموصلية الحرارية λ بـ $W/(m \cdot K)$	مكان استخدامها في المحرك	أسم المادة
161	الهيكل (هيكل المحرك)	Al - Si 20
54	المحور	steel (0.5% C)
240	قضبان الدائر المقصور للمحرك التحريضي	Al
36	قلب الثابت والدائر	Carbon steel 1.5% C)
386	ملفات الثابت والدائر أحياناً	Cu
0.2	ملفات الثبت وعازلية المجاري	عازل قماش غير مشبع
0.02624	هواء الثغرة والهواء المحيط	هواء درجة حرارته (300K)

حيث (l) هو طول محدد لصفحة أو سطح مدروس وأن (λ_f) معامل الموصلية الحرارية للسائل.

أما (P_r) فهو يمثل عدد براندتل (Prandtl) ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$P_r = C_f \cdot \mu / \lambda_f \quad (26)$$

حيث أن (C_f) هي السعة الحرارية للسائل وتقاس $J/(Kg \cdot C^0)$ وإن (μ_f) هو معامل اللزوجة للسائل ويقدر

بـ $[Kg/m \cdot s]$. أما المعامل (G_r) فهو رقم (Grashof) وهذا الرقم له علاقة بمقدرة السائل على حمل الأشياء

ويعطى بالعلاقة:

$$G_r = g \cdot \beta (\theta_w - \theta_f) \cdot l^3 / \nu^2 \quad (27)$$

حيث أن: ν - لزوجة السائل ؛ g - معامل الجاذبية الأرضية ويساوي إلى $(9.81m/s^2)$ ؛
 β - معامل التمدد الحراري $(1/C^0)$
 وأخيراً يمثل (R_e) عدد رينولدز ويعطى بالعلاقة:

$$R_e = \rho \cdot v_f \cdot l / \mu \quad (28)$$

حيث أن: (ρ) - كثافة السائل $[Kg/m^3]$ ؛ (v_f) - سرعة حركة السائل $[m/s]$.
 إن حركة التدفق الحراري تكون سهلة في حالة التهوية الطبيعية بينما لا تكون سهلة في حالة التهوية القسرية، بل تدفع باتجاه ما مثل المروحة أو المضخة أو العناصر الدوارة.

إن نسبة عدد (Grashof) إلى مربع عدد (Reynolds) يعطي عامل مهم لآلية التهوية:

$$K_{gr} = G_r / R_e^2 \quad (29)$$

نستنتج من ذلك إذا كان $(K_{gr} \gg 1)$ تكون عملية التهوية الطبيعية كافية للمحرك أو الآلة الكهربائية، أما إذا كان $(K_{gr} \ll 1)$ فلا بد من التهوية القسرية، لأن التهوية الطبيعية تكون غير كافية لوحدها.

على كلٍ تفضل عملية التهوية القسرية بالنسبة للآلات الكهربائية ويعطى هواء تبريد الآلة الكهربائية بالعلاقة التي تحسب فيه معامل انتقال الحرارة (α_c) بالشكل:

$$\alpha_{c,free} = 6.5 + 0.05(\theta_w - \theta_f) \quad (30)$$

تستخدم هذه المعادلة في تقدير الحرارة المنقولة من هيكل المحرك أو الآلة الكهربائية إلى الهواء المحيط وتكون المقاومة الحرارية في حالة الحمل:

$$R_{th} = 1/(\alpha_c \cdot A) \quad (31)$$

3-انتقال الحرارة بالإشعاع:

إن عملية انتقال الحرارة بالإشعاع بين جسمين تقودنا إلى قانون ستيفان- بولتسمان ويعطى بالعلاقة:

$$q_r = A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \delta(\theta_w^4 - \theta_f^4) \quad (32)$$

حيث أن: (A_1) - مساحة السطح الأول ؛ (ε_1) - إشعاع السطح الأول ويكون $[0 \leq \varepsilon \leq 1]$ وهو يساوي $\varepsilon = 0.96$ من أجل الحديد و $\varepsilon = 0.08$ من أجل الألمنيوم ؛ (δ) - ثابت ستيفان- بولتسمان ويساوي $[5.6697 \cdot 10^{-8} w/m^2 \cdot K^4]$.
 وتعطى المقاومة الحرارية للإشعاع المحيطي بالعلاقة:

$$R_{th} = \frac{\theta_w - \theta_f}{A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \delta(\theta_w^4 - \theta_f^4)} \quad (33)$$

التمثيل الحراري المكافئ للمحرك التحريضي:

1-نظرية التمثيل الحراري المكافئ:

إن هذه الطريقة تعتمد على تماثل (تتاظر) التدفقات الحرارية والتيارات الكهربائية وهذا التشابه أو التماثل يعتمد على الشكل الموحد لمعادلة التبادل الحراري " قانون فورييه " $(P = \Delta\theta \cdot Y)$ والتيار الكهربائي " قانون أوم " $(I = U \cdot G)$

في المخططات الحرارية المكافئة الفرق بدرجات الحرارة ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$) يوافق فرق التوتر (U)، والتدفق الحراري (P) يوافق التيار الكهربائي، أما الناقلية الحرارية (Y) فتوافق الناقلية الكهربائية (G). إن الافتراض الأساس لطريقة المخطط الحراري المكافئ يتكون من استبدال منابع الموزعة الفعلية للحرارة والناقلات الحرارية بمرافق وناقلات مركزة (متمركزة)، عندئذ تعتبر الأخيرة ثابتة ولا تتعلق بالفيز الحراري. إن مثل هذا التقريب يعطي إمكانية تحويل طريقة المخطط الحراري المكافئ إلى حساب دائرة خطية بطرق جبرية مبسطة، [1, 3, 5].

2- المعادلات الحرارية والمخطط الحراري المكافئ لمحرك تحريضي ثلاثي الطور:

إن الآلة الكهربائية في الحالة العامة يمكن وبشكل اصطلاحي تقسيمها إلى (n) عنصر متجانس ذات منابع داخلية للاستطاعة الحرارية ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$) مساوية أو مكافئة إلى الضياعات في هذه العناصر، وذات درجات حرارة ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$) موافقة لهذه العناصر بالترتيب. إن هذه العناصر مرتبطة مع بعضها البعض بواسطة الناقلات الحرارية ($Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}, \dots, Y_{1n}, \dots, Y_{n1}, Y_{n2}, \dots, Y_{n(n-1)}$). هذا يعني أن تصريف الحرارة من الآلة إلى الوسط المبرد (وسيط التبريد) يحصل من الكتلة أو الجسم (n) المرتبطة مع هذا الوسط بالناقلية أو الموصلية (Y_{n0}). يمكننا وفقاً لما ذكر أعلاه أن نكتب جملة المعادلات الجبرية الخطية التالية:

$$\begin{aligned} (\theta_1 - \theta_2) \cdot Y_{12} + (\theta_1 - \theta_3) \cdot Y_{13} + \dots + \dots + (\theta_1 - \theta_n) \cdot Y_{1n} &= P_1 \\ (\theta_2 - \theta_1) \cdot Y_{21} + (\theta_2 - \theta_3) \cdot Y_{23} + \dots + \dots + (\theta_2 - \theta_n) \cdot Y_{2n} &= P_2 \\ (\theta_3 - \theta_1) \cdot Y_{31} + (\theta_3 - \theta_2) \cdot Y_{32} + \dots + \dots + (\theta_3 - \theta_n) \cdot Y_{3n} &= P_3 \\ \dots + \dots + \dots + \dots + \dots &= \dots \\ \dots + \dots + \dots + \dots + \dots &= \dots \\ (\theta_n - \theta_1) \cdot Y_{n1} + (\theta_n - \theta_2) \cdot Y_{n2} + \dots + \dots + (\theta_n - \theta_0) \cdot Y_{n0} &= P_n \end{aligned} \quad (34)$$

بحل جملة المعادلات (34) وبمعرفة القيم (Y) و (P) يمكننا إيجاد درجة حرارة الأقسام (الأجزاء) المختلفة للآلة الكهربائية (θ)، وبناءً على جملة المعادلات الجبرية العامة السابقة يمكن أن نستنتج جملة المعادلات الحرارية للمحرك التحريضي ثلاثي الطور وذلك اعتماداً على المخطط الحراري له. باعتبار أن المحرك هو كتلة غير متجانسة يتألف من الهيكل والملفات والقلب والثغرة الهوائية وغيرها من الأقسام الأخرى فإن درجة الحرارة لا تكون نفسها في جميع أجزائه. بالتالي يمكن أن نمثل هذا المحرك بمجموعة من منابع الحرارة والمقاومات الحرارية التي تعيق انتقال الحرارة من المحرك إلى الوسط الخارجي وفي داخل المحرك أيضاً من كتلة إلى أخرى. يبين الشكل (1) لوحة توزيع منابع الحرارة والمقاومات الحرارية لمحرك تحريضي ثلاثي الطور والشكل (2) المخطط الحراري المبسط لهذا المحرك.

يتألف المخطط الحراري المبسط من (7) أقسام (أجزاء) هي: قلب الثابت مع درجة حرارة وسيطية (θ_{al}) وأسنان الثابت مع درجة حرارة وسيطية (θ_{z1}) والجزء الفعال لملف الثابت (الجزء من الملف المتوضع في المجرى للثابت) مع درجة حرارة وسيطية ($\theta_{cul,s}$) والقسم الطرفي (الجهوي لملف الثابت مع درجة حرارة وسيطية ($\theta_{cul,l}$)).

والدائر مع درجة حرارة وسيطية (θ_{Cu2}) والهواء الموجود داخل المحرك بدرجة حرارة وسيطية (θ_{ai}) وأخيراً الغلاف الخارجي للمحرك بدرجة حرارة وسيطية (θ_{Sh}).

إن هذه الأجزاء (الأقسام) موصولة مع بعضها البعض عبر موصلات حرارية مناسبة كما هو مبين على الشكل (1) للمخطط الحراري المكافئ للمحرك التحريضي ثلاثي الطور.

من هذا المخطط نستطيع أن نضع جملة مؤلفة من سبع معادلات بسبع مجاهل (حسب عدد أجزاء المحرك المدروسة) وباعتبار أن ($\theta_0 = 0$) نحصل على:

$$\begin{aligned}
 \theta_{a1}(Y_{\Delta 1} + Y_{S,a} + Y_{Za}) - \theta_{Z1} \cdot Y_{Za} - \theta_{Sh} \cdot Y_{\Delta 1} - \theta_{Cu1,S} \cdot Y_{S,a} &= P_{a1} \\
 \theta_{Z1}(Y_{Za} + Y_{S,Z} + Y_{1Z}) - \theta_{a1} \cdot Y_{Za} - \theta_{Cu1,S} \cdot Y_{S,Z} - \theta_{Z1} \cdot Y_{1Z} &= \sum P_{Z1} \\
 \theta_{Cu1,S}(Y_{S,a} + Y_{S,Z} + Y_{S,l}) - \theta_{a1} \cdot Y_{S,a} - \theta_{Z1} \cdot Y_{S,Z} - \theta_{Cu1,l} \cdot Y_{S,l} &= P_{Cu1,S} \\
 \theta_{Cu1,l}(Y_{S,l} + Y_{1l}) - \theta_{Cu1,S} \cdot Y_{S,l} - \theta_{ai} \cdot Y_{1l} &= P_{Cu1,l} \\
 \theta_{Cu2}(Y_{12} + Y_{l2}) - \theta_{Z1} \cdot Y_{12} - \theta_{ai} \cdot Y_{l2} &= \sum P_{Cu2} \\
 \theta_{ai}(y_{1l} + Y_{l2} + Y_{\alpha,fr} + Y_{\alpha,b}) - \theta_{Cu1,l} \cdot Y_{1l} - \theta_{Cu2} \cdot Y_{l2} - \theta_{Sh}(Y_{\alpha,fr} + Y_{\alpha,b}) &= P_{mech,i} \\
 \theta_{Sh}(Y_{\Delta 1} + Y_{fr} + Y_b + Y_{\alpha,fr} + Y_{\alpha,b}) - \theta_{a1} \cdot Y_{\Delta 1} - \theta_{ai}(Y_{\alpha,fr} + Y_{\alpha,b}) &= 0
 \end{aligned} \tag{35}$$

من أجل تقليل جملة المعادلات (35) نحدد في البداية زيادة أو ارتفاع درجة حرارة الأقسام فوق درجة حرارة الغلاف:

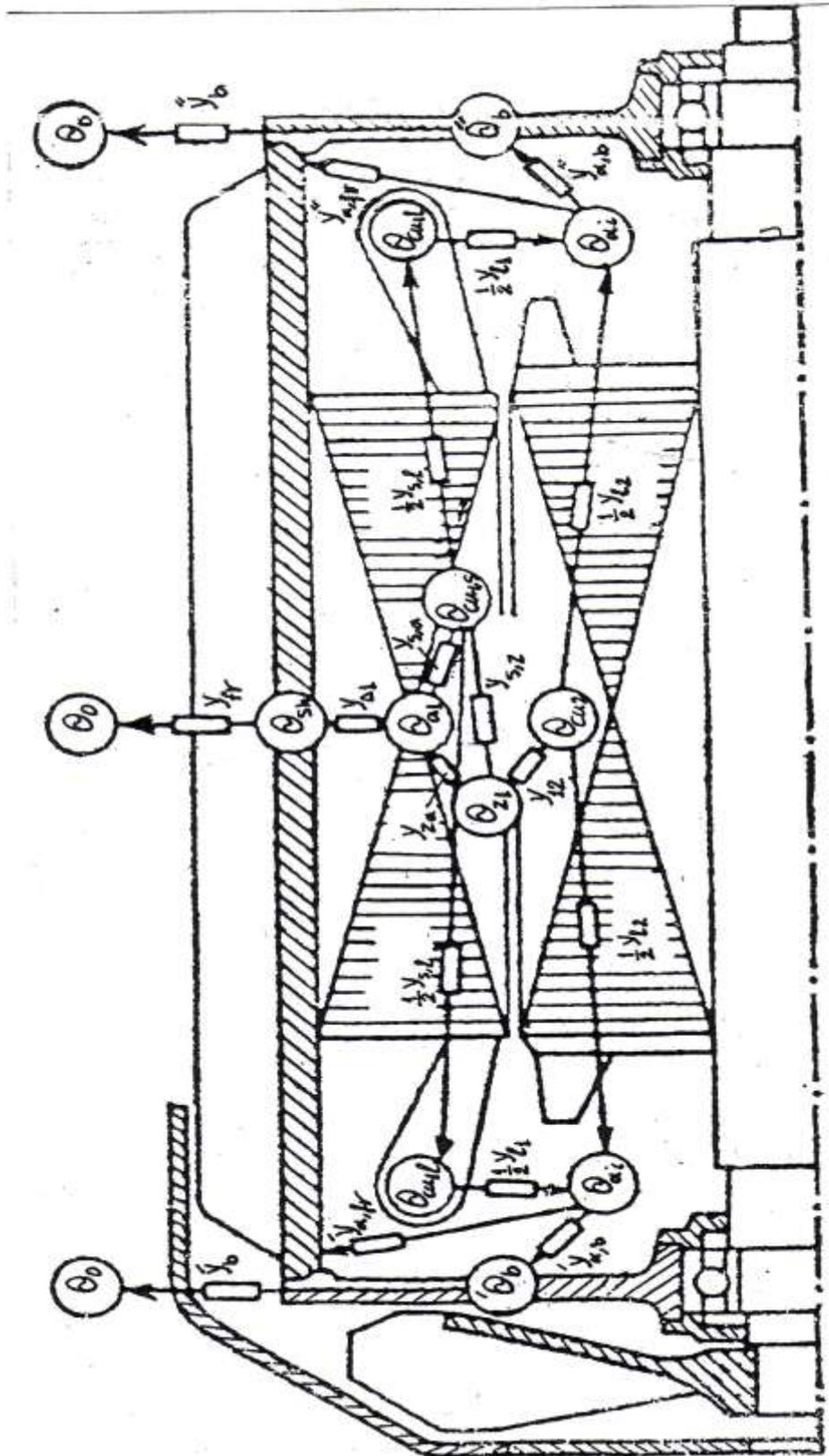
$$\begin{aligned}
 \Delta\theta'_{a1} = \theta_{a1} - \theta_{Sh} \quad ; \quad \Delta\theta'_{Z1} = \theta_{Z1} - \theta_{Sh} \quad ; \quad \Delta\theta'_{Cu1,S} = \theta_{Cu1,S} - \theta_{Sh} \quad ; \\
 \Delta\theta'_{Cu1,l} = \theta_{Cu1,l} - \theta_{Sh} \quad ; \quad \Delta\theta'_{Cu2} = \theta_{Cu2} - \theta_{Sh} \quad ; \quad \Delta\theta'_{ai} = \theta_{ai} - \theta_{Sh}
 \end{aligned} \tag{36}$$

وبإدخال القيم أو الرموز التالية:

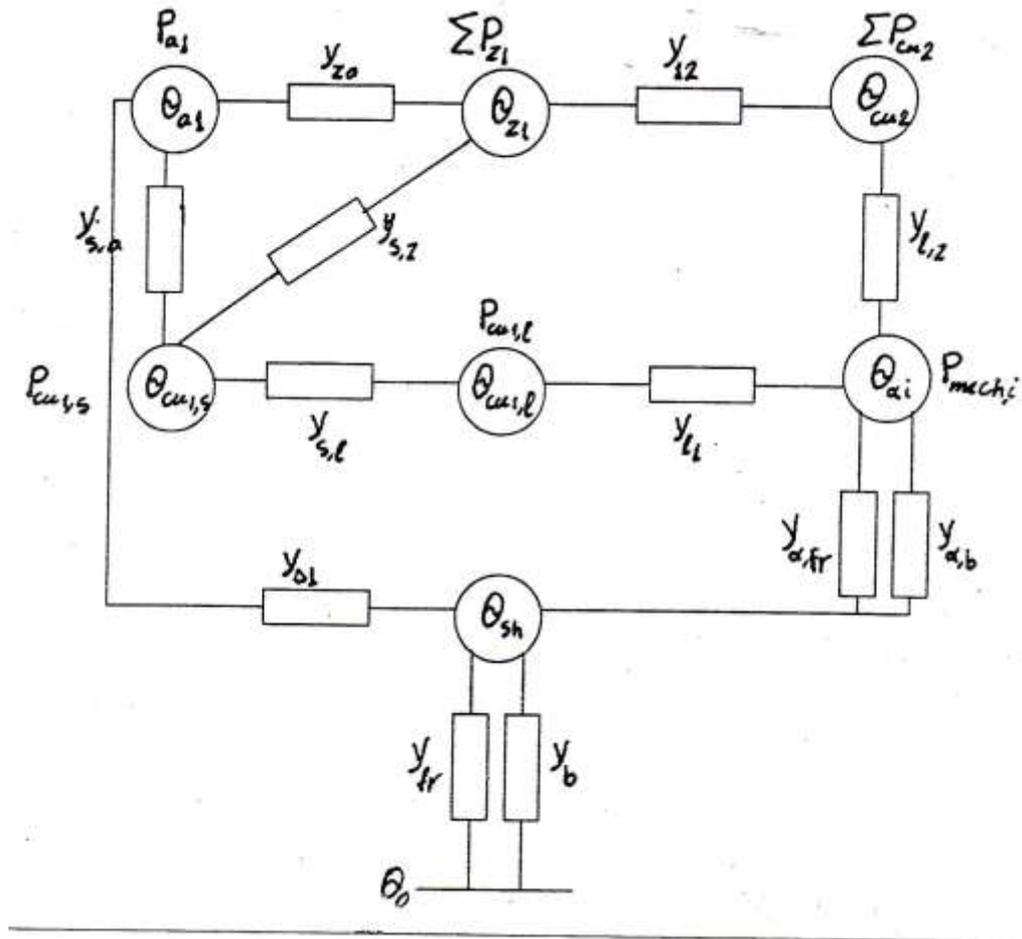
$$\begin{aligned}
 Y_{\Delta 1} + Y_{S,a} + Y_{Z,a} = Y_{11} \quad ; \quad Y_{Z,a} + Y_{S,Z} + Y_{1Z} = Y_{22} \quad ; \quad Y_{S,a} + Y_{S,Z} + Y_{S,l} = Y_{33} \\
 Y_{S,l} + Y_{1l} = Y_{44} \quad ; \quad Y_{12} + Y_{l2} = Y_{55} \quad ; \quad Y_{1l} + Y_{l2} + Y_{ai} = Y_{66} \quad ; \quad Y_{\alpha,fr} + Y_{\alpha,b} = Y_{ai} \\
 Y_{fr} + Y_b = y_{Sh}
 \end{aligned}$$

نحصل على الشكل الجديد للمعادلات الجبرية للمحرك التحريضي:

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta'_{a1} \cdot Y_{11} - \Delta\theta'_{Z1} \cdot Y_{Z,a} - \Delta\theta'_{Cu1,S} \cdot Y_{S,a} &= P_{a1} \\
 \Delta\theta'_{Z1} \cdot Y_{22} - \Delta\theta'_{a1} \cdot Y_{Z,a} - \Delta\theta'_{Cu1,S} \cdot Y_{S,Z} - \Delta\theta'_{Z1} \cdot Y_{1Z} &= \sum P_{Z1} \\
 \Delta\theta'_{Cu1,S} \cdot Y_{33} - \Delta\theta'_{a1} \cdot Y_{S,a} - \Delta\theta'_{Z1} \cdot Y_{S,Z} - \Delta\theta'_{Cu1,l} \cdot Y_{S,l} &= P_{Cu1,S} \\
 \Delta\theta'_{Cu1,l} \cdot Y_{44} - \Delta\theta'_{a1} \cdot Y_{1l} - \Delta\theta'_{Cu1,S} \cdot Y_{S,l} &= P_{Cu1,l} \\
 \Delta\theta'_{Cu2} \cdot Y_{55} - \Delta\theta'_{Z1} \cdot Y_{12} - \Delta\theta'_{ai} \cdot Y_{l2} &= \sum P_{Cu2} \\
 \Delta\theta'_{ai} \cdot Y_{66} - \Delta\theta'_{Cu1,l} \cdot Y_{1l} - \Delta\theta'_{Cu2} \cdot Y_{l2} &= P_{mech,i}
 \end{aligned} \tag{37}$$



الشكل (1) - لوحة توزيع المنابع الحرارية والناقلات الحرارية لمحرك تحريضي ثلاثي الطور



الشكل (2) - المخطط الحراري المبسط لمحرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دوار مقصور

○ - منبع حراري ؛ □ - مقاومة حرارية متمثلة بناقليتها الحرارية

اعتماداً على ما سبق نجد أن مقدار ارتفاع درجة حرارة الغلاف للمحرك فوق درجة حرارة الوسط المبرد (وسط التبريد) يساوي:

$$\Delta\theta_{Sh} = \frac{P_{a1} + \sum P_{Z1} + P_{Cu1,s} + P_{Cu1,l} + \sum P_{Cu2} + P_{mech,i}}{Y_{Sh}} \quad (38)$$

عندئذ مقدار ارتفاع درجة حرارة الأقسام الفعالة للمحرك فوق درجة حرارة وسط التبريد توافق:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{a1} &= \Delta\theta'_{a1} + \Delta\theta_{Sh} + 0.5\Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{z1} &= \Delta\theta'_{z1} + \Delta\theta_{Sh} + 0.5\Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{Cu1,s} &= \Delta\theta'_{Cu1,s} + \Delta\theta_{Sh} + 0.5\Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{Cu1,l} &= \Delta\theta'_{Cu1,l} + \Delta\theta_{Sh} + 0.5\Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{Cu2} &= \Delta\theta'_{Cu2} + \Delta\theta_{Sh} + 0.5\Delta\theta_0 \end{aligned} \quad (39)$$

مقدار تسخين هواء التبريد الخارجي المحيط بالآلة بسبب التصريف الحراري:

$$\Delta\theta_0 = \sum P / (C_0 \cdot \rho \cdot Q_p) \quad (40)$$

إذ أن: (C_0) - السعة الحرارية النوعية لهواء التبريد (لهواء المبرد) ؛ (ρ) - كثافة الهواء ؛
 (Q_p) التدفق أو الاستهلاك الحراري ؛ $\sum P$ مجموع الضياع في المحرك عند العمل الاسمي

متوسط ارتفاع درجة حرارة ملف الثابت فوق درجة حرارة الهواء المبرد :

$$\Delta\theta_{Cul} = (\Delta\theta_{Cul,S} \cdot l_1 + \Delta\theta_{Cul,l} \cdot l_{L1}) / (l_1 + l_{L1}) \quad (41)$$

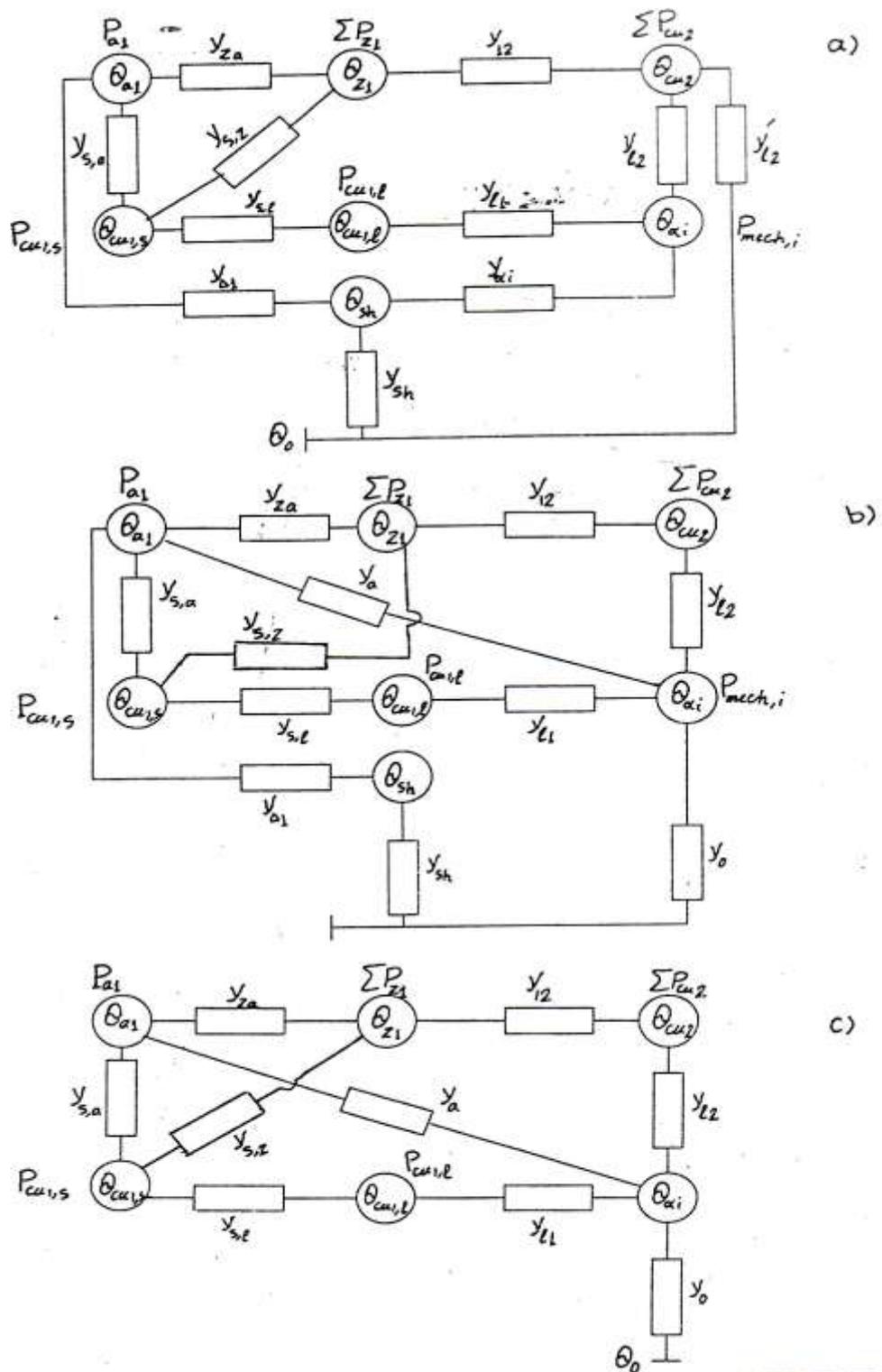
حيث أن طول المجرى (الطول الفعال للملف l_1) وطول الأقسام الجبهوية للملف l_{L1} يتغيرا مع تغير نوع المجرى واستطاعة المحرك وتحسب بقوانين معروفة ومعلومة [1, 3, 5].

يبين الشكل (3) المخططات الحرارية المكافئة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور بدرجات حماية مختلفة وذات أنظمة تبريد مختلفة أيضا

النتائج والتوصيات:

- بعد إجراء الدراسة التحليلية المتمثلة بالموديل الرياضي والدراسة الحرارية اعتماداً على المخطط الحراري المكافئ للمحرك التحريضي ثلاثي الطور ومن ثم دراسة المحددات المتغيرة بهدف تحسين أدائه ومواصفاته وذلك عن طريق عملية التبادل الحراري توصلنا إلى النتائج التالية :
- 1- وضع المخطط الحراري المكافئ للمحرك التحريضي ثلاثي الطور عند درجات حماية ميكانيكية وأنظمة تبريد مختلفة ووضع المعادلات الجبرية لهذا المخطط .
 - 2- إمكانية وضع المخطط الحراري المكافئ لأي عنصر كهربائي (محرك،مولد،كابل، محول،.....الخ) بطريقة مماثلة.
 - 3- معرفة درجات الحرارة في أي جزء من أجزاء المحرك اعتماداً على المعادلات الجبرية المستنتجة من المخطط الحراري المكافئ وإمكانية برمجة هذه المعادلات .
 - 4- تحسين أداء المحرك (المردود) عن طريق تحسين عمليات التبادل الحراري (عن طريق التغيير في قيمة الناقلية الحرارية Y) .

وأخيراً نقترح : اعتماداً على هذه الدراسة التحليلية المتمثلة بالموديل الرياضي والمعادلات الجبرية المستنتجة دعمها بالدراسة التجريبية على المحرك التحريضي ثلاثي الطور و بمساعدة الحاسوب لوضع برنامج شامل لدراسة الحسابات الحرارية عن طريق المحددات المتغيرة لتحديد النموذج الأمثل في تصميم وبناء المحركات بشكل عام والمحرك التحريضي ثلاثي الطور بشكل خاص .



الشكل (3) - المخططات الحرارية المكافئة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور

- درجة الحماية الميكانيكية (IP44) ونظام التبريد (IC0141) وتبريد مسرع للدائر ؛ (One
- درجة الحماية الميكانيكية (IP23(22) ونظام تبريد (IC01) مع نظام تهوية محورية ؛ (Two
- درجة الحماية الميكانيكية (IP23(22) ونظام تبريد (IC01) مع نظام شعاعية متوازنة (متماثلة). (Three

المراجع:

.....

- 1- E. P. Copelov – Design of electrical machines , Moscow , 1980
- 2- O. I. Okaro – Dynamic and thermal modeling of induction machines with non- linear effects – 2002 .
- 3- Gabril Benmouyal , Stanlay E. Zochall – Using thermal limit curves to define thermal models of induction motors , USA – 2001 .
- 4- د. عزت سعيد حسن – تصميم الآلات الكهربائية – منشورات جامعة تشرين – 1995 – 1996 م.
- 5- د. عزت سعيد حسن – الآلات الكهربائية (الآلات التحريضية) – جامعة تشرين – 2003 – 2004 م.
- 6- د. مارديروس آرا صايغ ، د. رضوان المصري – انتقال الحرارة – منشورات جامعة حلب – 1995 م.
- 7- فيتالي أوخوتين – مبادئ الهندسة الحرارية – ترجمة المهندس عيسى الزيدي – موسكو 1990 م.